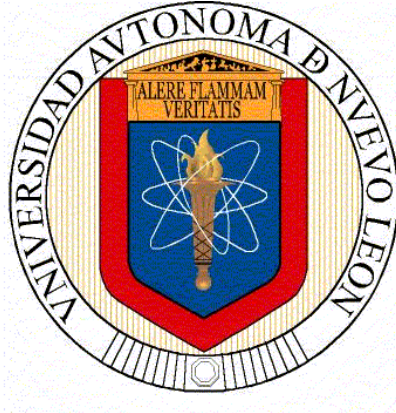


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**AJUSTE DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR
BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE TECA
(*TECTONA GRANDIS* L. F.) EN YUCATÁN, MÉXICO**

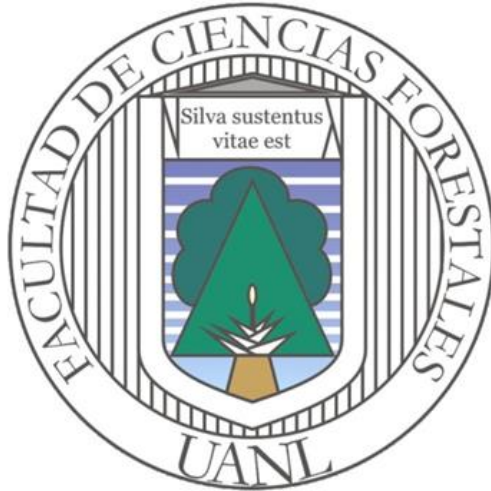
POR

PABLO MARROQUÍN MORALES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

AGOSTO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**AJUSTE DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR
BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE TECA
(*TECTONA GRANDIS* L. F.) EN YUCATÁN, MÉXICO**

POR

PABLO MARROQUÍN MORALES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

AGOSTO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**

**AJUSTE DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR
BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE TECA
(*TECTONA GRANDIS* L. F.) EN YUCATÁN, MÉXICO**

POR:

PABLO MARROQUÍN MORALES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

Comité de tesis:



Dr. Javier Jiménez Pérez



Dr. Oscar A. Aguirre Calderón

Asesor



Dr. José I. Yerena Yamallel

Asesor



M. c. Dorian de J. Pimienta de la Torre

Asesor externo

Linares, Nuevo León, México

Agosto, 2019

Manifiesto que la investigación que se presenta es original y fue desarrollada para obtener el grado de Maestría en Ciencias Forestales, donde se utiliza información de otros autores e investigadores donde se otorgan los créditos correspondientes.

AGRADECIMIENTOS

Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)

A la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL por darme la oportunidad de formar parte del programa de Maestría en Ciencias Forestales.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Al CONACYT por haberme otorgado la beca para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias Forestales.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez

Por todo el apoyo que me ha brindado y por su gran asesoramiento para la elaboración de esta tesis y por su gran ayuda para la revisión del presente escrito.

Al Dr. Oscar A. Aguirre Calderón

Por todos los consejos que me ha dado para la elaboración de la investigación y por formar parte de este comité.

Al Dr. José I. Yerena Yamallel

Por su asesoría para la elaboración del presente trabajo, y el apoyo que me ha brindado y sobre todo por ser parte del comité de tesis.

M. c. Dorian de J. Pimienta de la Torre

Por el apoyo y la revisión que me ha brindado para la mejora del escrito y por su amistad.

Profesores de la UANL

Por todos los conocimientos y consejos que me compartieron para el buen desarrollo profesional.

Laboratorio de carbono

A todos los que apoyaron para la realización de esta investigación, Claudio Castillo, Dora García, Jesús Ortega, Eduardo y Joe.

Compañeros y amigos

Ana, Rebeca, Renata, Yare, Yosi, Eduardo. Beatriz, Claudia, Carlos, Erick, Julián, Marco, y Francisco. Juan Carlos, Juan Manuel, Ricardo, Maygualida, Irlamar y José Antonio. Por los buenos momentos que compartimos juntos, y por su valiosa amistad que me han dado.

DEDICATORIA

A Dios

Por darme vida, salud y sabiduría, y así poder terminar la maestría con mucha satisfacción.

A mis padres:

Efraín Marroquín Gómez y Nelly Morales Guzmán

Por todos los consejos que me dan para ser una mejor persona y por todo el apoyo que me brindan cada día, este logro es para ustedes.

A mis hermanos:

José Ángel, Elías, Joel (†) y Karen Maythe

Por todo el apoyo que me han brindado y sobre todo por mantener la unidad como familia por las cosas que hemos pasado, muchas gracias por todo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 HIPÓTESIS	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 General	3
1.2.2 Específicos	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Cambio Climático	4
2.2 Protocolo de Kioto.....	5
2.3 Efecto invernadero	6
2.4 Fotosíntesis	7
2.5 Biomasa.....	7
2.6 Métodos para estimar biomasa	8
2.7 Ciclo del carbono.....	9
2.8 Porcentaje y almacenamiento de carbono	10
2.9 Dióxido de carbono	11
2.10 Plantaciones como sumidero de carbono.....	12
2.11 Plantaciones de Teca	12
	i

2.12 Generalidades de <i>Tectona grandis</i>	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1 Área de estudio.....	15
3.2 Generalidades de <i>Tectona grandis</i>	16
3.3 Obtención de biomasa	16
3.4 Ajuste y selección del modelo.....	17
3.5 Elaboración de tablas de biomasa	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1 Características dasométricas de los árboles derribados de <i>Tectona grandis</i>	19
4.2 Coeficientes de regresión de las ecuaciones matemáticas en <i>Tectona grandis</i>	20
4.3 Estadísticos de ajuste por componente de <i>Tectona grandis</i>	23
4.3.1 Componente hojas	24
4.3.2 Componente ramas	25
4.3.3 Componente fuste	25
4.3.4 Componente total	26
4.4 Representación de la biomasa en cada componente de <i>Tectona grandis</i>	27
4.4.1 Estimación de biomasa en el componente hojas	28
4.4.2 Estimación de biomasa en el componente ramas	29
4.4.3 Estimación de biomasa en el componente fuste	30
4.4.4 Estimación de biomasa en el componente total	31
4.5 Acumulación de biomasa en cada uno de los componentes de <i>Tectona grandis</i>	32

4.6 Biomasa por categoría diamétrica en cada componente de <i>Tectona grandis</i>	33
4.7 Error por cada componente de biomasa de <i>Tectona grandis</i>	34
4.8 Comparación de biomasa aérea estimada con otros autores	35
4.9 Tabla de biomasa en <i>Tectona grandis</i>	36
5. CONCLUSIONES	39
6. LITERATURA CITADA.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Cuadro 1. Modelos lineales y no lineales para estimar biomasa aérea de <i>Tectona grandis</i>	17
Cuadro 2. Características dasométricas de los árboles derribados de <i>Tectona grandis</i>	20
Cuadro 3. Coeficientes de los modelos lineales y no lineales para estimar biomasa por componente en <i>Tectona grandis</i>	22
Cuadro 4. Estadísticos de ajuste de las ecuaciones matemáticas para estimar biomasa por compartimentos en <i>Tectona grandis</i>	26
Cuadro 5. Estimación de biomasa en <i>Tectona grandis</i>	37

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	15
Figura 2. Biomasa observada y estimada de hojas en <i>Tectona grandis</i>	28
Figura 3. Biomasa observada y estimada de ramas en <i>Tectona grandis</i>	29
Figura 4. Biomasa observada y estimada de fuste en <i>Tectona grandis</i>	30
Figura 5. Biomasa observada y estimada total en <i>Tectona grandis</i>	31
Figura 6. Reserva de biomasa por componentes (n = 32 individuos)	33
Figura 7. Proporción de biomasa en cada componente de <i>Tectona grandis</i>	34
Figura 8. Errores de predicción en cada componente de <i>Tectona grandis</i>	35
Figura 9. Comparación de ecuaciones desarrolladas para estimar la biomasa aérea.....	36

RESUMEN

Las ecuaciones alométricas estiman la biomasa, a partir de ello se determinan los montos de carbono que puede ser liberada a la atmósfera o conservada. Para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, se conservan áreas naturales y se establecen plantaciones forestales. El objetivo de esta investigación fue ajustar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Tectona grandis*. El estudio se realizó en Tizimín, Yucatán. Para cuantificar la biomasa se utilizó el método directo, derribando 32 árboles, estos individuos son promedios en diámetro normal y altura total, posteriormente se determinó el peso verde en campo por componente y se extrajeron submuestras para determinar la relación Peso seco-Peso verde, y así calcular el peso seco total de cada componente del árbol. Se ajustaron modelos lineales y no lineales, utilizando variables independientes de diámetro normal y altura, seleccionando el mejor ajuste de modelo mediante el mayor coeficiente de determinación (R^2), menor error estándar (S_{yx}) y menor número de variables independientes (k). Los resultados indican que el diámetro normal estima eficientemente la biomasa en cada uno de los componentes, siendo el modelo no lineal (potencial) el que presentó mejor ajuste, principalmente en el componente fuste y total con un R^2 de 0.96. El 17 % de la biomasa total fue registrada en hojas, 35 % en ramas y 48 % en fuste. Con la ecuación alométrica ajustada de este estudio es posible estimar la biomasa en cada uno de los compartimentos para las plantaciones de *Tectona grandis*.

Palabras clave: Ajuste, alometría, biomasa, componente, teca.

ABSTRACT

The allometric equations estimate the biomass, from which the amounts of carbon that can be released to the atmosphere or conserved are determined. To mitigate greenhouse gas emissions, natural areas are conserved and forest plantations are established. The objective of this investigation was to adjust allometric equations to estimate aerial biomass in *Tectona grandis*. The study was conducted in Tizimín, Yucatán. To quantify the biomass the direct method was used, felling 32 trees, these individuals are averages in normal diameter and total height, later the green weight in field was determined by component and subsamples were extracted to determine the relation Dry weight-Green weight, and so calculate the total dry weight of each component of the tree. Linear and nonlinear models were adjusted, using independent variables of normal diameter and height, selecting the best model adjustment using the highest coefficient of determination (R^2), the smallest standard error (Syx) and the lowest number of independent variables (k). The results indicate that the normal diameter efficiently estimates the biomass in each of the components, with the nonlinear (potential) model having the best fit, mainly in the stem and total component with an R^2 of 0.96. 17% of the total biomass was recorded in leaves, 35% in branches and 48% in stem. With the adjusted allometric equation of this study it is possible to estimate the biomass in each of the compartments for the plantations of *Tectona grandis*.

Key words: Fit, allometry, biomass, component, teak.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal es un parámetro fundamental, la cual indica la acumulación de materia orgánica en un ecosistema a lo largo del tiempo y se cuantifica normalmente en toneladas de peso seco existente en un área forestal, esta puede ser aérea o subterránea, la biomasa aérea se separa en componentes como son hojas, ramas y fuste (Schlegel *et al.*, 2000).

La biomasa área puede ser cuantificada mediante el método destructivo o no destructivo. El método destructivo consiste en derribar el árbol, separar sus componentes y pesarlos, a si también se obtienen muestras de cada componente para determinar su biomasa de dicho componente y total (Díaz *et al.*, 2007).

El método no destructivo se basa principalmente en ecuaciones de volumen que se obtiene mediante regresiones, teniendo como variables independientes principalmente el diámetro y la altura, se requiere también la densidad básica y un factor de expansión, este método se utiliza primordialmente con fines de conservación, debido a que no se aprovecha ningún árbol (Nirala *et al.*, 2018).

La biomasa de un árbol o un ecosistema es de gran importancia ya que posteriormente nos permite calcular la cantidad de carbono y dióxido de carbono que puede ser absorbida o liberada a la atmósfera (Brown *et al.*, 1996).

La distribución de biomasa que almacena la teca en cada componente cambia conforme la edad, de tal forma que la proporción del fuste y las ramas tienden aumentar, caso contrario para la proporción de hojas (Kumar, 2009).

La biomasa aérea acumulada de teca es variable y depende de las diferentes condiciones que rigen el crecimiento de los árboles como son la genética, el clima y el suelo, debido a estas condiciones se realizan ajustes de modelos o ecuaciones alométricas para cada zona de estudio (Pacheco *et al.*, 2007).

La teca (*Tectona grandis*) actualmente es considerada como una de las especies del trópico con mayor importancia maderable, debido a su durabilidad natural y resistencia contra hongos e insectos como las termitas (Miranda *et al.*, 2011; Verhaegen *et al.*, 2010).

La teca es una especie forestal exótica de importancia para las plantaciones forestales comerciales (PFC) en México, la cual se ha adoptado para el sur de México especialmente en los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Nayarit (CONAFOR, 2013).

Las plantaciones forestales comerciales, protegen el suelo, ayudan a disminuir la tala de los bosques naturales, y generan ingresos económicos para las comunidades rurales, es por eso que México ha incrementado su superficie apoyando al establecimiento de más de 200,000 hectáreas de PFC (CONAFOR, 2013).

Las plantaciones forestales desempeñan un papel de gran importancia ya que disminuyen el dióxido de carbono que hay en la atmósfera a un ritmo mayor, debido al rápido crecimiento que tienen y sobre todo la cantidad de carbono que almacenan en su estructura vegetal, y que acaban por inmovilizarse cuando se construyen casas de madera, muebles y otros productos donde se utiliza la madera como materia prima (López *et al.*, 2018; Nirala *et al.*, 2018).

La falta de información sobre la estimación de biomasa y carbono en las plantaciones forestales en México (Aguirre y Jiménez, 2011) no nos permiten conocer realmente la contribución que tienen para mitigar el cambio climático, por ese motivo se realizó esta investigación para conocer las cantidades de biomasa que tiene la teca en sus diferentes componentes.

1.1 HIPÓTESIS

Las ecuaciones no lineales presentan mayor ajuste para la estimación de biomasa que las ecuaciones lineales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Ajustar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Tectona grandis*.

1.2.2 Específicos

Cuantificar biomasa aérea en árboles individuales de *Tectona grandis*.

Ajustar modelos alométricos para estimar biomasa en hojas, ramas y fuste de *Tectona grandis*.

Generar una tabla que estime biomasa en cada uno de los componentes.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cambio Climático

El cambio climático está asociado en el aumento de temperatura superficial del planeta, incrementándose por los gases de efecto invernadero (GEI) provocados por las actividades antropogénicas, los bosques tienen como función la mitigación de emisiones de GEI, es por eso la importancia de conservarlos y protegerlos (Arango, 2011).

El cambio climático es uno de los procesos más importantes a nivel global con múltiples y complejos efectos ambientales y sociales (FAO, 2016). El uso de la madera es considerado importante para la mitigación del cambio climático, porque favorece la absorción y almacenamiento del carbono que se encuentra en el ambiente, reduciendo así las emisiones a través de sus diferentes usos (Matsumoto *et al.*, 2016).

Las actividades humanas han sido las causas del calentamiento global, por lo tanto, se requiere hacer acciones para mitigar el cambio climático, el IPCC (2013) considera dos enfoques para mitigar el cambio climático, una es aumentar bosques para la retención de carbono y la otra es usar madera para reducir las emisiones, ya que quedan almacenadas en la madera.

El aumento de los gases de efecto invernadero han causado una variación del clima, teniendo un aumento de dióxido de carbono en el planeta, debido a eso ha surgido la necesidad de determinar la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas, de los cuales los bosques capturan en sus diferentes depósitos como son: aéreo, subterráneo, suelo y mantillo (Ordoñez *et al.*, 2015).

2.2 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto y sus mecanismos de flexibilidad En la Conferencia de las Partes de La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en Kioto (Japón) en diciembre de 1997, se adoptó para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global (SEMARNAT, 2016).

El Protocolo de Kioto entró en operación en 2005 y constituyó un primer esfuerzo para controlar los gases de efecto invernadero (GEI), ofreciendo un marco básico de acción para la lucha contra el cambio climático a escala internacional. A si también promueve el desarrollo sustentable de los países en desarrollo. El Protocolo contiene metas vinculantes de reducción y limitación de emisiones de gases de efecto invernadero para 37 países industrializados y la Comunidad Europea (Ranero y Covaleda, 2018).

Hoy en día las actividades humanas como la ganadería y la agricultura afectan un fuerte cambio hacia los recursos forestales, aumentando así los gases de efecto invernadero y generando cambios en el clima. La creciente preocupación sobre las consecuencias en la disminución de los recursos naturales, dio lugar a varios compromisos internacionales que apuntan a reducir esta problemática de los recursos, es por eso que el protocolo establece una serie de estrategias para mitigar y reducir el impacto atmosférico de las emisiones de dióxido de carbono, lo que dio lugar a la creación del mercado internacional del carbono. En México se tienen extensas áreas forestales que puede situarse como un país en el mercado del carbono como un importante proveedor de servicios ambientales. Por lo tanto, la conservación y la restauración de bosques en México pueden verse como una potencial oportunidad de negocios, lo cual contribuiría al desarrollo socioeconómico del país. (Badano, 2011).

2.3 Efecto invernadero

Los gases que se encuentran en la atmósfera y absorben la radiación infrarroja procedente de la tierra o radiación saliente, son llamados gases de efecto invernadero. Los principales GEI emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial (19%), forestal (17%), agrícola (14%), residencial y comercial (8%) y de manejo de desechos (3%) (IPCC, 2013).

La absorción de los gases hace que la atmósfera se caliente, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Una parte de la radiación se libera al espacio y otra es retenida a la superficie de la tierra. Las dos terceras partes de la energía radiante atmosférica son devueltas a la superficie. Este efecto permite que la tierra almacene más energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar si la tierra no tuviera atmósfera, consecuentemente, la temperatura es más alta, del orden de 33°C más, a este proceso se le conoce como efecto invernadero natural. Si no hubiera efecto invernadero la temperatura promedio que se tendría en la superficie fuera de 18 °C bajo cero y la vida en el planeta no sería posible (Benavides y León, 2007).

El IPCC (2013) establece que las emisiones de CO₂ acumuladas determinarán el calentamiento global, la mayoría de los aspectos del cambio climático perdurarán durante muchos siglos, incluso aunque pararan las emisiones de CO₂, debido a las emisiones pasadas, presentes y futuras. Las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado causando mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático, para contener el cambio climático será necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de GEI.

2.4 Fotosíntesis

Las plantas presentan el proceso de fotosíntesis, siendo un proceso de carácter físico-químico en donde las plantas, a través de la conversión de la energía lumínica a energía química, y la absorción de dióxido de carbono, sintetizan compuestos orgánicos utilizados para la mantención de los tejidos propios de la planta y de las reservas de carbohidratos o para la formación de nuevos tejidos (Chapin *et al.*, 2002).

Las plantas son autótrofas, donde todos los tejidos verdes de las plantas pueden fotosintetizar, la mayor parte de la fotosíntesis ocurre en las hojas. El proceso de fotosíntesis consiste principalmente en dos fases. La fase luminosa es la primera parte de la fotosíntesis y corresponde a la absorción de la energía lumínica por parte de los cloroplastos, esta fase es básicamente equivalente para todas las plantas. La fase oscura corresponde a la fijación de dióxido de carbono para transformarlo en carbohidratos y oxígeno (Taiz y Zeiger, 2002).

2.5 Biomasa

La biomasa es el contenido de materia orgánica que se encuentra almacenada en los diferentes componentes del ecosistema y está constituida por el peso seco de la materia orgánica aérea y subterránea (Fonseca *et al.*, 2009). La cuantificación y el monitoreo de la biomasa acumulada en la vegetación de los ecosistemas forestales es de utilidad para estimar el carbono almacenado y la tasa anual de fijación de dióxido de carbono, lo cual tiene gran relevancia para la mitigación del calentamiento global. La cuantificación de la biomasa permite estimar la magnitud de recursos forestales disponibles (Cifuentes, 2010; Cuenca *et al.*, 2014).

El almacenamiento y distribución de biomasa puede ser diferentes para cada una de las especies y esta influenciados por factores relacionados como: desarrollo

del rodal, edad, calidad del sitio, composición de especies, variables ambientales, densidad del rodal, y prácticas silvícolas. A si también la distribución de biomasa varía en cada uno de los componentes del árbol (Figueroa *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2012).

La biomasa varía en función de la composición florística y la estructura de la vegetación y, al igual que la mayoría de los procesos ecosistémicos, está ligada a la disponibilidad de agua. La biomasa ha sido utilizada para cuantificar las entradas y salidas de carbono y de los gases de efecto de invernadero en el ecosistema (Escobar y Maass, 2008). En los ecosistemas forestales la descomposición mediante la combustión en biomasa de hojas, ramas, corteza, fuste y raíces puede ser la ruta principal al aumento de gases de efecto invernadero, es por eso que se debe manejar los recursos forestales para seguir conservando la biomasa mediante los árboles (Chapin *et al.*, 2011).

2.6 Métodos para estimar biomasa

Existen dos tipos de métodos para estimar la biomasa, el primero es el método directo y el segundo es el indirecto. El primero involucra procedimientos destructivos, el cual consistente en cortar árboles y determinar su peso en campo, posteriormente extraer submuestras por componente, siendo estas secadas y pesadas en seco para obtener una relación y calcular la biomasa (Cuenca *et al.*, 2014; Schlegel, 2001).

En el método indirecto se utilizan técnicas de cubicación del árbol, donde se suman los volúmenes de madera o se estima mediante ecuaciones, así también se utiliza la densidad básica de dicha especie, y un factor de expansión para calcular la biomasa total de todo el árbol (Fonseca *et al.*, 2009).

Otra forma indirecta de estimar la biomasa es a través de ecuaciones alométricas basadas en análisis de regresión lineal, no lineal y exponenciales con variables

como el diámetro normal (medido a 1.3 m de altura) y la altura total de cada árbol (Cuenca *et al.*, 2014).

La estimación de biomasa en cualquier especie presentará una variabilidad, debido al desarrollo de la especie, tipo de suelo, precipitación, y nutrientes, afectando a si su desarrollo en el crecimiento de la especie. A si también cada especie tiene una distribución de biomasa o acumulación debido a su rápido crecimiento, por lo tanto, la estimación adecuada de la biomasa de un bosque es de gran relevancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y dióxido de carbono (Picard *et al.*, 2012).

2.7 Ciclo del carbono

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos, y es almacenado por los árboles. El carbono en su unión molecular con el oxígeno, constituye el dióxido de carbono, este gas es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Jaramillo, 2010).

El ciclo de carbono se determina por el almacenamiento y la transferencia entre la atmósfera, biósfera, litósfera y océanos de moléculas constituidas por el elemento carbono. Para el estudio del ciclo del carbono es importante entender la diferencia entre un stock y un flujo de carbono. En un bosque, la reserva de carbono es todo aquello que se encuentra almacenado en los diferentes componentes como son las hojas, ramas, fuste, raíces, hojarasca, madera y suelo, y los flujos son todos aquellos procesos que afectan el stock mediante la combustión, regresando al ambiente todo lo almacenado y aumentando el dióxido de carbono (Honorio y Baker, 2010).

Cuando cuantificamos el almacenamiento de un bosque, muestreamos la biomasa en cada uno de los componentes. Sin embargo, cuando se cuantifica

los flujos del carbono en el bosque se muestrea la fotosíntesis. El incremento neto en la biomasa debido a la fotosíntesis, excluyendo el carbono utilizado en la respiración se denomina productividad primaria neta (Martín, 2010).

2.8 Porcentaje y almacenamiento de carbono

Las concentraciones de carbono varían dependiendo la especie, Yerena et al. (2012) realizaron un estudio de carbono en 21 especies de coníferas del noreste de México, donde encontraron una concentración de carbono en promedio de 48.39 %.

El contenido de carbono que se tiene en el componente leñoso de las plantas es aproximadamente el 50 %, esta concentración de carbono se ve afectado por la forma de crecimiento del árbol (Becerril *et al.*, 2014).

La concentración de carbono que tiene *Tectona grandis* en promedio es de 55 %, esta concentración considera los componentes de hojas, ramas, fuste, tocón y raíz (González *et al.*, 2014).

Aguirre y Jiménez (2011) determinaron el contenido de carbono de especies de pino y encino, mediante un analizador de carbono orgánico, el porcentaje de los individuos de *Pinus pseudostrobus* fue 50.35, en *Pinus teocote* 47.78 y en *Quercus* spp. 48.43.

Para conocer el almacenamiento de carbono que tiene una especie, se debe tener la concentración de carbono, esta concentración puede ser más específico si se tiene por componente. Para el almacenamiento de carbono es necesario conservar las masas forestales que se tiene hoy en día, o mediante la regeneración o reforestación de los bosques, a si también la implementación de nuevas áreas forestales como son las plantaciones forestales comerciales (Martínez *et al.*, 2003).

2.9 Dióxido de carbono

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (el principal gas de efecto invernadero, al cual contribuye en un 64%) ha ido aumentando de forma significativa (un 30% más que en 1975) a principios de la revolución industrial, esto se debe a la combustión de derivados del petróleo y de la reducción de la masa forestal (deforestación), dando lugar al incremento del efecto invernadero, la cual se le denomina calentamiento global (Doménech, 2007).

La adopción de prácticas agroforestales es una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano, debido a que contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono, y amortiguan la presión sobre los ecosistemas vulnerables (bosques y selvas). Las plantaciones forestales capturan carbono y almacenan biomasa en hojas, ramas, fuste, corteza y raíces, la captura va a depender de las especies que se encuentren en el bosque o en una plantación, y de los factores climáticos como precipitación, temperatura, edad y las características del suelo ya que determinan el crecimiento del árbol (Wheeler *et al.*, 2016).

Por otra parte, la capacidad de capturar carbono atmosférico en edades tempranas o intermedias es mayor, caso contrario en árboles adultos, por eso es conveniente la reforestación y la restauración de bosques ya que son una opción importante para la mitigación (Fonseca *et al.*, 2011; Spracklen y Righelato, 2016).

Las plantaciones juegan un papel muy importante ya nos brindan servicios ambientales uno de ellos es la captura de carbono, mitigando así el dióxido de carbono, también conservan la flora y la fauna (López *et al.*, 2016).

2.10 Plantaciones como sumidero de carbono

Hay que considerar que las plantaciones forestales tienen una retención de carbono que se prolonga más allá de la vida de la plantación. El carbono que se almacena en el árbol es por medio de la fotosíntesis descontando el proceso oxidativo respiratorio, retenido en su biomasa, este va en aumento conforme va creciendo el árbol. Otras proporciones de carbono son las que se acumulan en la materia orgánica del suelo (Pardos, 1999).

Las plantaciones nos brindan servicios ambientales como son los recursos hídricos, recuperación de biodiversidad, alimento para fauna. Además de obtener estos beneficios, algunas especies presentan un valor económico debido a su madera. Implementar las plantaciones sería una buena alternativa ya que almacenan el carbono, disminuyendo así los gases de efecto invernadero siendo estos los principales al incremento del cambio climático (Fonseca *et al.*, 2009).

Un estudio realizado en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) se generó emisiones de 2, 541 ton/año de CO₂ equivalente durante el periodo 2007 – 2009, y estas emisiones podrían llegar a 3,741 ton/año de CO₂ del 2011 – 2021, por el cual el ITCR decidió plantar los últimos 10 años con la especie de *Gmelina arborea* en un total de 170 ha⁻¹ mitigando 52, 077 ton/año de CO₂, la cual redujo las emisiones (Arguedas, 2011).

2.11 Plantaciones de Teca

La teca (*Tectona grandis* L. f.) es una especie tropical, con un alto valor económico, siendo así una de las especies más plantadas a nivel mundial, con una superficie aproximada de 5,819,000 ha⁻¹, esto es un 74 % del total de las plantaciones duras en el mundo (FAO, 2009).

Los países de China, India y Tailandia a partir del año 2005 a 2014 han doblado su producción en términos de volumen de madera en rollo de 557, 000 hasta 1.2 millones de metros cúbicos, para Centroamérica, existen aproximadamente 225, 000 ha⁻¹ de plantaciones forestales de las cuales 41, 000 ha⁻¹ corresponden a la especie de teca (FAO, 2002; FAO, 2015).

Al momento de establecer la teca es importante considerar las características del suelo, ya que requiere suelos con densidad y acidez baja, drenajes profundos y poca pendiente (Zhoukunann *et al.*, 2012). Debido a que no se toman estas consideraciones se ha encontrado plantaciones juveniles (menores a cinco años de edad) establecidas en sitios no óptimos, afectando al desarrollo y calidad de las plantaciones debido a los altos niveles de compactación de suelo (Boley *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2014).

Las plantaciones de teca presentan aproximadamente un aumento anual de 11 %, identificándose como el futuro cultivo para su establecimiento (FAO, 2015). Para propiciar una plantación de teca se debe considerar los factores de adaptación a cada país debido a la diferencia de condiciones climáticas, ejemplo en México la especie de teca se adapta a estados del sur, con alta productividad y crecimiento rápido, considerando un turno de 23 años de edad (Camacho *et al.*, 2013).

2.12 Generalidades de *Tectona grandis*

Los árboles de teca son nativos del sur de Asia, principalmente en los países de la India, Myanmar, República Democrática, Tailandia e Indonesia. También se han establecido en América Latina y el Caribe primordialmente en los países de Costa Rica, Colombia, Ecuador, El Salvador, Panamá, Venezuela y México (Pandey y Brown, 2000).

La teca es una especie importante por el alto precio que alcanza su madera, la rapidez de su crecimiento es intermedia y se han propuesto turnos de 20 a 30 años, aunque la madera de árboles más jóvenes también tiene buena aceptación comercial (Camacho *et al.*, 2013).

La teca se considera una madera de alta calidad, debido a sus excelentes propiedades que presentan, convirtiéndose en una de las especies tropicales más valiosas del mundo junto a las especies de cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*). La especie de teca presenta propiedades en el duramen como son durabilidad natural, estabilidad dimensional, facilidad para trabajar, resistencia a enfermedades (hongos) y plagas (termitas), y sobre todo una belleza estética de madera. La madera presenta alta demanda para diferentes usos como son la construcción de muebles, revestimiento de embarcaciones y objetos lujosos, estos múltiples usos que tiene la teca hace que presente un valor económico susceptible a los mercados internacionales para su comercialización (Tewari *et al.*, 2014)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

La zona de estudio se llevó a cabo en una plantación de *Tectona grandis* de 1, 4, 5 y 6 años de edad, localizada en el municipio de Tizimín, en la región noreste del estado de Yucatán, teniendo una superficie de 841.09 hectáreas. Geográficamente se ubica entre los 21° 19' 25.23" y 21° 21' 13.64" de latitud norte y entre los 87° 46' 20.18" y 87° 47' 34.70" de longitud oeste (Figura 1). La temperatura media anual es de 25.3 °C, con una precipitación media anual de 1,167 mm. El clima se define como cálido subhúmedo con lluvias regulares en verano. En el área predominan suelos leptosoles, luvisoles y phaeozems. La orografía que se presenta es plana y la altitud es de 19 m (García-CONABIO, 1998).

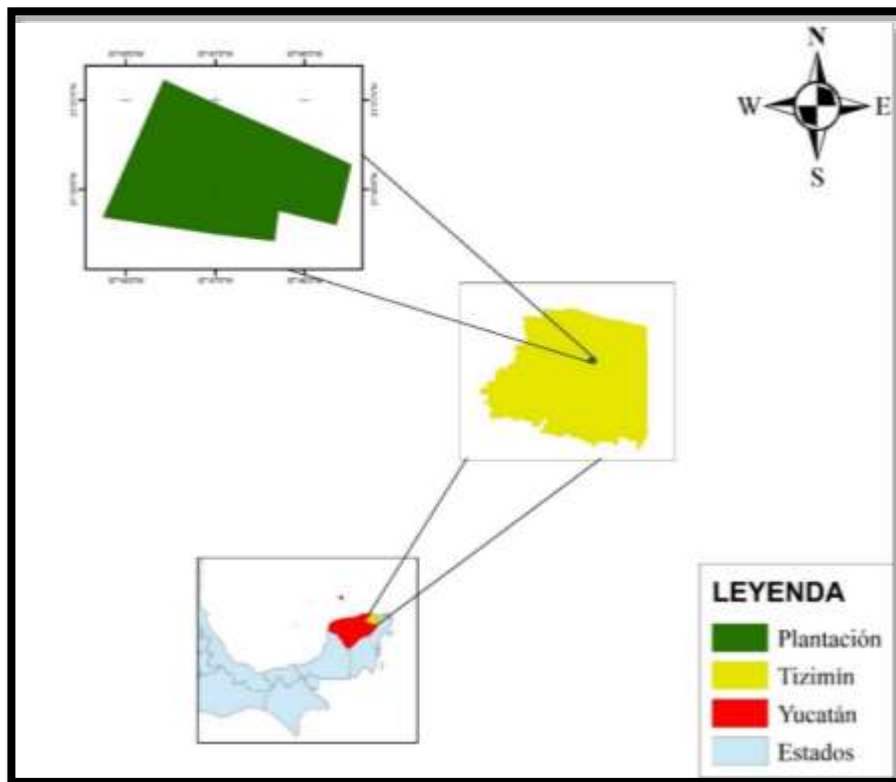


Figura 1. Ubicación del área de estudio

3.2 Generalidades de *Tectona grandis*

Tectona grandis se le conoce comúnmente como teca, esta especie es originaria de la India, Birmania, Tailandia, Java e Indonesia. Es un árbol de 25 a 30 m de altura puede alcanzar los 50 m, fustes con un diámetro mayor de 29 cm, las hojas son opuestas, grandes, de 11 a 85 cm de largo y de 6 a 50 cm de ancho (Fierros *et al.*, 1999). Se presenta a una altitud de 0 a 1 500 m, un pH neutro a ligeramente ácido, una temperatura de 17 a 46 °C, precipitaciones de 625 a 3 000 mm, puede soportar de 3 a 5 meses de sequía. La teca tolera un amplio intervalo de suelos, siempre y cuando sean profundos y bien drenados. La madera es empleada para la fabricación de muebles, chapas, floreros, ebanistería, puertas, construcción de casas, entre otros (Pandey y Brown, 2000).

3.3 Obtención de biomasa

El estudio se realizó en 16 sitios de muestreo permanentes de la plantación, los sitios fueron de 27 x 27 m (729 m²). Para cuantificar la biomasa se utilizó el método directo que consiste en derribar el árbol. Se procedió el aprovechamiento de 32 árboles (2 por sitio), estos individuos son promedios de cada sitio en función de su diámetro normal (d) y altura total (h). Los árboles seleccionados se caracterizaron por estar libre de enfermedades y daños mecánicos en su estructura y cada individuo se identificó con una etiqueta de campo (número de sitio).

Antes de proceder a su derribo se midió el d y h de cada individuo. Posteriormente se separaron los diferentes componentes, hojas con ramas finas menores de 1 cm de diámetro, ramas y fuste, determinando el peso verde total de cada componente. Para cada componente se extrajeron tres submuestras, y se determinó el peso verde en campo. Estas submuestras se llevaron a laboratorio y se secaron en una estufa marca Riossa a 105 °C, hasta obtener su peso

constante, finalmente se pesó en seco con una báscula digital (Es-Series-ES6R) de 2 kg de capacidad y 1 g de precisión.

Con los datos obtenidos se calculó la relación peso seco-peso verde promedio para cada componente. Para obtener la biomasa por componente, se multiplicó el peso verde total de cada componente (hojas, ramas y fuste) por su relación correspondiente. Para obtener la biomasa total por árbol se sumó el peso seco de cada componente.

3.4 Ajuste y selección del modelo

Se probaron modelos lineales y no lineales (Cuadro 1) que han sido ocupados frecuentemente (Acosta, 2003; Rodríguez *et al.*, 2009) en la estimación de biomasa de hojas, ramas, fuste y total, los cuales se ajustaron con el método de cuadrados mínimos en el paquete estadístico R Project (R Core Team, 2018). Los criterios de decisión para seleccionar el mejor ajuste de modelo fue mediante el mayor coeficiente determinación (R^2), menor error estándar (S_{yx}) y el menor número de variables independientes (k).

Cuadro 1. Modelos lineales y no lineales para estimar biomasa aérea de *Tectona grandis*

Nº	Nombre	Ecuación matemática
Lineales		
1	Variable combinada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d^2 * h)$
2	Variable combinada generalizada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d^2) + \beta_2 * (h) + \beta_3 * (d^2 * h)$
3	Meyer modificada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d) + \beta_2 * (d * h) + \beta_3 * (d^2 * h)$
No lineales		
4	Potencial	$B = \beta_0 * (d)^{\beta_1}$

5 Potencial variable
combinada

$$B = \beta_0 * (d^2 * h)^{\beta_1}$$

B = biomasa (kg); β_0, \dots, β_3 = coeficientes de regresión; d = diámetro normal del árbol (cm); h = altura total (m).

3.5 Elaboración de tablas de biomasa

La biomasa se estimó con el modelo de potencia, debido a que presentó el mejor ajuste en comparación con el resto, elaborando así las tablas de biomasa en cada uno de los componentes (hojas, ramas, fuste y total) de teca, estas fueron realizadas por categorías diamétricas para una mejor representación en la estimación de la especie.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Características dasométricas de los árboles derribados de *Tectona grandis*

Los 32 árboles derribados obtuvieron diámetros a partir de 5.0 hasta 15.0 cm, y una altura promedio de 8.47 m. Así mismo se obtuvo una biomasa desde 3.0 hasta los 22.0 kg en los diferentes componentes (Cuadro 2).

Con la misma especie de teca, pero con diferentes edades (de 1 hasta 19 años), han evaluado un número de individuos de 16 a 30 árboles, siendo este tamaño de muestra menor al de este estudio (Gerardo *et al.*, 2018; Murillo *et al.*, 2015; Portuguez, 2012; Rodríguez *et al.*, 2018). Sin embargo, otros autores en plantaciones de teca con edades de 4 a 47 años, el tamaño de individuos que seleccionaron fue de 40 a 49 árboles, siendo mayores estos individuos al de este estudio (Correa y Romero, 2016; kraenzel *et al.*, 2003; Mbaekwe y Mackenzie, 2008; Pérez y kanninen, 2003).

González *et al.* (2014) realizaron un estudio para evaluar el crecimiento y potencial de secuestro y fijación de biomasa y carbono, donde el número de individuos a evaluar fue el mismo (32) a este estudio. Así mismo la plantación de teca de 5 años de edad, presentó un diámetro de 12.0 cm y una altura de 10.60 m en promedio, siendo estos similares al que presenta este estudio. Sin embargo, para la biomasa promedio en cada uno de sus compartimentos fueron mayores al de este estudio, obteniendo 16.78 kg en ramas, 18.93 kg en fuste y 37.47 kg en total. Solo para la biomasa en hojas fue lo contrario obteniendo 1.76 kg.

En una plantación de teca en Tailandia con una edad de 6 años obtuvieron diámetros de 4.4 a 11.7 cm y alturas que van desde los 5.50 hasta los 10.80 m, estas dos variables son similares a esta investigación (Viriyaabuncha *et al.*, 2001).

Mbaekwe y Mackenzie (2008) realizaron un estudio para estimar biomasa aérea en una plantación de teca en Nigeria, con tan solo una edad de 5 años, encontrando una biomasa promedio de 5.01 kg en hojas, 7.37 kg en ramas, 29.70 kg en fuste y 42.08 kg en total, para los dos primeros componentes la biomasa fue similar a la que se presenta en el Cuadro 2. Aunque para el componente fuste y total fueron mayores al de esta investigación.

Las especies tropicales de *Eucalyptus grandis* y *Hevea brasiliensis* con edades de 4 y 5 años, presentaron un diámetro promedio de 20.90 y 14.05 cm, con una altura de 21.90 y 11.33 m, estas dos especies, con sus respectivas variables de diámetro y altura son mayores a las que se presentan en el Cuadro 2 (López *et al.*, 2016; Winck *et al.*, 2015).

Cuadro 2. Características dasométricas de los árboles derribados de *Tectona grandis*

Variables	Promedio	Mínimos	Máximos
<i>d</i>	10.45	5.75	15.00
<i>h</i>	8.47	5.60	13.00
Bh	3.79	0.77	9.84
Br	8.07	0.68	21.46
Bf	10.92	1.26	22.91
Bt	22.77	3.26	54.21

d = diámetro normal (cm); *h* = altura (m); Bh = biomasa de hojas (kg); Br = biomasa de ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); Bt = biomasa total (kg).

4.2 Coeficientes de regresión de las ecuaciones matemáticas en *Tectona grandis*

Respecto al Cuadro 3, todos los modelos presentaron una buena significancia ($P < 0.05$) en sus coeficientes de estimación en cada uno de los componentes del árbol de teca. La ordenada al origen del modelo 4 fue menor en los componentes

hojas y ramas en comparación con el resto de los modelos. Además los coeficientes de pendiente de (β_1) 3.611097 en biomasa de hojas y (β_1) 3.220557 en biomasa total del modelo 4 presentaron cierta similitud, estos mismos coeficientes obtuvieron valores más altos que el resto de los componentes.

Para los componentes fuste y total presentaron una similitud en sus valores de la ordenada al origen (0.021320 y 0.018321) y la pendiente (2.612900 y 2.971090) de la línea de regresión en el modelo 4. De manera general, el modelo 4 presentó el mismo signo positivo en la ordenada al origen y la pendiente para los diferentes componentes, teniendo un intervalo de coeficientes a partir de 0.000611 a 0.021320 en β_0 y para el β_1 va desde 2.612900 hasta 3.611097.

El valor mínimo del coeficiente del modelo 4 se presentó en hojas y el máximo en fuste, sin embargo, para la pendiente fue lo contrario, es decir el valor mínimo fue en fuste y el superior en hojas. Cabe mencionar que para todos los β_0 del modelo 4 en los diferentes componentes presentaron los menores errores estándares (Cuadro 3).

Con la misma especie y el mismo modelo al que se ajustó este estudio Kenzo et al. (2009) reportaron coeficientes de $\beta_0 = 0.018$ y $\beta_1 = 1.830$ en hojas, este coeficiente de β_0 fue mayor al de este estudio, sin embargo en la pendiente fue todo lo contrario. Sin embargo, para los coeficientes ($\beta_0 = 0.060$, $\beta_1 = 2.550$) de fuste y ($\beta_0 = 0.082$ y $\beta_1 = 2.430$) total fueron similares al de esta investigación.

Buvaneswaran et al. (2006) encontraron coeficientes de $\beta_1 = 2.152, 2.523, 2.523$ en hojas, ramas y fuste. Los valores de estos coeficientes son menores al que presentó este estudio, cabe mencionar que el modelo es el mismo y la especie también.

Con la misma variable de diámetro, pero con diferente modelo en cada uno de los componentes de biomasa, los coeficientes de regresión fueron diferentes al de esta investigación obteniendo valores de $\beta_0 = -2.138$ y $\beta_1 = 2.272$ en hojas, $\beta_0 = -2.380$ y $\beta_1 = 2.290$ ramas, $\beta_0 = -0.804$ y $\beta_1 = 2.303$ en fuste y $\beta_0 = -0.815$ $\beta_1 = 2.382$ en total (Pérez y kanninen, 2003).

Para la misma especie y con la misma variable independiente otros autores han encontrado coeficientes de regresión similares al de este estudio; $\beta_0 = 0.202$, 0.077 y $\beta_1 = 2.353$ y 2.546 en biomasa total (Buvaneswaran *et al.*, 2006; Ounban *et al.*, 2016). A si también Viriyabuncha *et al.* (2001) y Viriyabuncha *et al.* (2002) encontraron coeficientes de regresión de $\beta_0 = 0.045$ y $\beta_0 = 0.026$, estos coeficientes de origen son semejantes a este estudio para el componente total.

Murillo *et al.* (2015) utilizaron un modelo no lineal, para la misma especie de teca, donde encontraron coeficientes diferentes al de este estudio de $\beta_0 = 2.703$ y $\beta_1 = 0.148$ en biomasa de hojas, $\beta_0 = 0.729$ y $\beta_1 = 0.282$ en biomasa de ramas, $\beta_0 = 13.212$ y $\beta_1 = 0.209$ en biomasa de fuste y $\beta_0 = 22.211$ $\beta_1 = 0.2094$ en biomasa total.

Cuadro 3. Coeficientes de los modelos lineales y no lineales para estimar biomasa por componente en *Tectona grandis*

N°	β_0	EE	β_1	EE	β_2	EE	β_3	EE
Biomasa Hojas								
1	-0.448595	0.4790	0.004048	0.000	.		.	
2	5.478912	1.8430	-0.001140	0.014	-1.052907	0.259	0.007033	0.001
3	2.329351	1.4670	0.208056	0.174	-0.147982	0.023	0.012317	0.001
4	0.000611	0.0000	3.611097	0.263	.		.	
5	0.000895	0.0010	1.194432	0.155	.		.	
Biomasa Ramas								
1	-0.976093	1.031	0.008636	0.000	.		.	

2	2.651889	4.764	0.059039	0.037	-0.958655	0.670	0.004000	
3	-2.641592	4.023	1.124190	0.479	-0.194263	0.063	0.016067	0.004
4	0.003508	0.002	3.220557	0.302	.		.	
5	0.004204	0.004	1.086656	0.152	.		.	
Biomasa Fuste								
1	-0.017560	0.756	0.010443	0.000	.		.	
2	-2.852905	2.821	0.094593	0.022	0.008949	0.396	0.002620	0.002
3	-6.808438	2.432	1.493362	0.289	-0.091857	0.038	0.010088	0.002
4	0.021320	0.007	2.612900	0.145	.		.	
5	0.015479	0.008	0.946041	0.077	.		.	
Biomasa Total								
1	-1.442249	1.969	0.023127	0.001	.		.	
2	5.277896	6.914	0.152492	0.055	-2.002612	0.972	0.016053	0.006
3	-7.120680	5.886	2.825608	0.701	-0.434102	0.092	0.038471	0.007
4	0.018321	0.007	2.971090	0.155	.		.	
5	0.017270	0.012	1.033580	0.101	.		.	

N° = número del modelo; β_0, \dots, β_3 = coeficientes; EE = Error estándar de los coeficientes.

4.3 Estadísticos de ajuste por componente de *Tectona grandis*

De las 5 ecuaciones matemáticas que se probaron en cada uno de los componentes, se seleccionó el modelo (4) no lineal denominado potencial ($B = \beta_0 * (d)^{\beta_1}$) debido a que presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2), menor error estándar (S_{yx}) y el menor número de variables independientes (k) para cada uno de los compartimentos.

La ecuación 4 se ajustó para estimar biomasa en cada uno de los componentes, se necesita solo una variable independiente, siendo esta el diámetro. Esta variable es la que mejor predice la biomasa a través de regresiones. A si mismo otros autores estiman la biomasa en cada uno de los compartimentos (hojas,

ramas fuste y total) con sola la variable diámetro (Gerardo *et al.*, 2018; Nirala *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2018).

Los mejores coeficientes de determinación (R^2 de 0.96) se presentaron en biomasa de fuste y total, con errores de 1.31 a 3.17 kg, sin embargo, los ajustes más bajos se registraron en ramas y hojas con una R^2 de 0.88 y 0.92, con errores a partir de 0.81 a 2.13 kg (Cuadro 4).

4.3.1 Componente hojas

En una plantación de teca en Costa Rica, Pérez y kanninen (2003) encontraron un modelo logarítmico para estimar biomasa de hojas con solo la variable diámetro, reportando un coeficiente de determinación (R^2 de 0.83) más baja al de este estudio, con un error de 0.19 kg, siendo este error menor al que se presenta en el componente hojas (Cuadro 4).

En una plantación de teca en Panamá, Murillo *et al.* (2015) ajustaron un modelo no lineal en biomasa de hojas reportando un R^2 de 0.81, este valor es menor al que se encontró en este estudio. Con el mismo modelo y especie de esta investigación, Buvaneswaran *et al.* (2006) encontraron un menor R^2 de 0.71 y así mismo un menor error de 0.33 kg.

Para el caso de especies tropicales como son *Vochysia guatemalensis* y *Hieronyma alchorneoides*, Fonseca *et al.* (2009) encontraron R^2 de 0.89 y 0.94, con errores de 0.52 y 0.36 kg, para la primera especie tropical el R^2 fue menor al de este estudio, sin embargo, para *H. alchorneoides* fue todo lo contrario. Para ambas especies los errores fueron menores en comparación a esta investigación.

4.3.2 Componente ramas

En una plantación de teca en Costa Rica se obtuvo un coeficiente de determinación similar (R^2 de 0.89) al de esta investigación en el componente ramas, y con un error de 0.189, siendo este error menor al de este trabajo (Pérez y kanninen, 2003).

Winck et al. (2015) realizaron un estudio para predecir biomasa en ramas en *Eucalyptus grandis*, donde encontraron un R^2 de 0.83, siendo este valor inferior al de este estudio. Con la misma especie de teca, pero con edades de 3 a 18 años, Murillo et al. (2015) encontraron un menor ajuste con un R^2 de 0.84 para el componente ramas.

4.3.3 Componente fuste

Con el mismo modelo al de este estudio, pero con árboles tropicales, reportaron un R^2 de 0.96 para el componente fuste, siendo este valor igual al que se encontró en este trabajo (kenzo et al., 2009). Sin embargo, en una plantación de teca con el modelo potencial, encontraron un ajuste mayor (R^2 de 0.97) y un error (Syx de 0.212) menor al que se presenta en el fuste del Cuadro 4 (Ounban et al., 2016).

Gerardo et al. (2018) realizaron un estudio en una plantación de teca en Guatemala, encontrando un coeficiente de determinación (R^2 de 0.89) inferior al de este estudio. Otros autores, con la misma variable de diámetro para estimar biomasa de fuste, reportaron coeficientes de determinación ($R^2 > 0.97$) mayores al de esta investigación, así mismo con errores (Syx < 0.40) menores al de este estudio (Fonseca et al., 2009).

4.3.4 Componente total

En plantaciones de teca, pero con diferentes modelos al de este trabajo, encontraron ajustes ($R^2 \geq 0.96$) similares y errores (0.0049 kg) inferiores al que se presenta en el componente total del Cuadro 4 (Bohre *et al.*, 2013; Viriyabuncha *et al.*, 2001; Viriyabuncha *et al.*, 2002). Aunque para otros autores encontraron coeficientes de determinación ($R^2 < 0.77$) menores al de esta investigación (Ebuy *et al.*, 2011; Gerardo *et al.*, 2018).

El mismo modelo potencial se ajustó para la estimación de biomasa total en plantaciones de teca en India y Tailandia, los autores reportaron R^2 de 0.97 siendo estos valores semejantes al de este estudio y errores no mayores de 0.21 kg (Buvaneswaran *et al.*, 2006; Ounban *et al.*, 2016). Sin embargo, Rodríguez *et al.* (2018) y Chukwu y Osho (2018) encontraron coeficientes de determinación ($R^2 > 0.92$) inferiores al que reporta este estudio, aunque para los errores estándares (9.24 kg) fueron mayores.

kraenzel *et al.* (2003) encontraron un R^2 (0.97) similar y errores (0.056) menores al de esta investigación en una plantación de teca en Panamá. Aunque para Ola-Adams (1997) reportó un R^2 de 0.94, siendo este valor inferior al que se presenta en el componente total del Cuadro 4.

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste de las ecuaciones matemáticas para estimar biomasa por compartimentos en *Tectona grandis*

Nº	R^2	Syx	CV	K	n
Biomasa Hojas					
1	0.77	1.34	35.38	1	32
2	0.91	0.86	22.61	3	32
3	0.92	0.81	21.41	3	32
4	0.92	0.81	21.37	1	32
5	0.78	1.32	34.91	1	32

Biomasa Ramas					
1	0.77	2.88	35.76	1	32
2	0.87	2.21	27.45	3	32
3	0.87	2.23	27.59	3	32
4	0.88	2.13	26.41	1	32
5	0.77	2.91	36.05	1	32
Biomasa Fuste					
1	0.90	2.12	19.37	1	32
2	0.95	1.50	13.70	3	32
3	0.96	1.35	12.32	3	32
4	0.96	1.31	12.01	1	32
5	0.90	2.10	19.20	1	32
Biomasa Total					
1	0.87	5.50	24.17	1	32
2	0.96	3.21	14.11	3	32
3	0.96	3.26	14.30	3	32
4	0.96	3.17	13.92	1	32
5	0.87	5.54	24.34	1	32

N° = Número del modelo; R^2 = Coeficiente de determinación; Syx = Error estándar (kg); CV = Coeficiente de variación; K = Número de variables independientes; n = Tamaño de muestra.

4.4 Representación de la biomasa en cada componente de *Tectona grandis*

Las figuras (2 - 5) fueron representadas con el mejor modelo (4) ilustrando el comportamiento de las curvas de biomasa para cada uno de los componentes, en función de su diámetro. Sin embargo, en los coeficientes de variación hubo pocas diferencias interespecíficas en los componentes de biomasa, excepto para el de ramas (Cuadro 4).

4.4.1 Estimación de biomasa en el componente hojas

Estimar este componente es de gran utilidad, debido a que, en las estaciones secas, cuando el árbol pierde gran parte de sus hojas, el componente hojas puede ser estimado para conocer la biomasa perdida del árbol (Pérez y Kaninen 2003).

La contribución de la biomasa en hojas tiende a hacer mayor en los primeros años, es decir, en diámetros menores, sin embargo, la biomasa en hojas disminuye conforme va creciendo el árbol, ya que se aplican podas para el buen manejo de la plantación. El componente hojas presentó una variación de 21.37 %. Esta variabilidad se expresa con los datos estimados respecto a los observados, presentándose mayormente en los primeros diámetros (Figura 2).

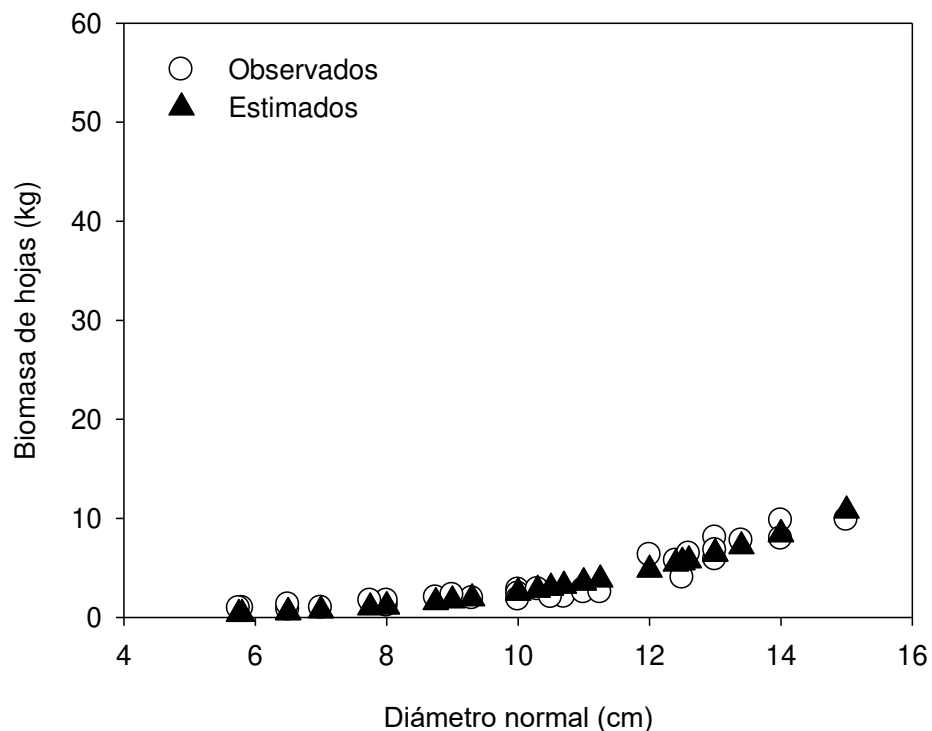


Figura 2. Biomasa observada y estimada de hojas en *Tectona grandis*

4.4.2 Estimación de biomasa en el componente ramas

La biomasa de ramas presenta la mayor variación (26.41 %) en comparación con el resto de los componentes (hojas, fuste y total). Esta variación se presenta mayormente en los últimos diámetros de este estudio (Figura 3).

Estas diferencias de variación que se presenta en la biomasa de ramas son normales, debido a la diferencia de crecimiento que tiene cada componente en el árbol (Aguirre y Jiménez, 2011). Otro autor menciona que ningún otro componente presenta mayor variación que el de ramas (López, 2012).

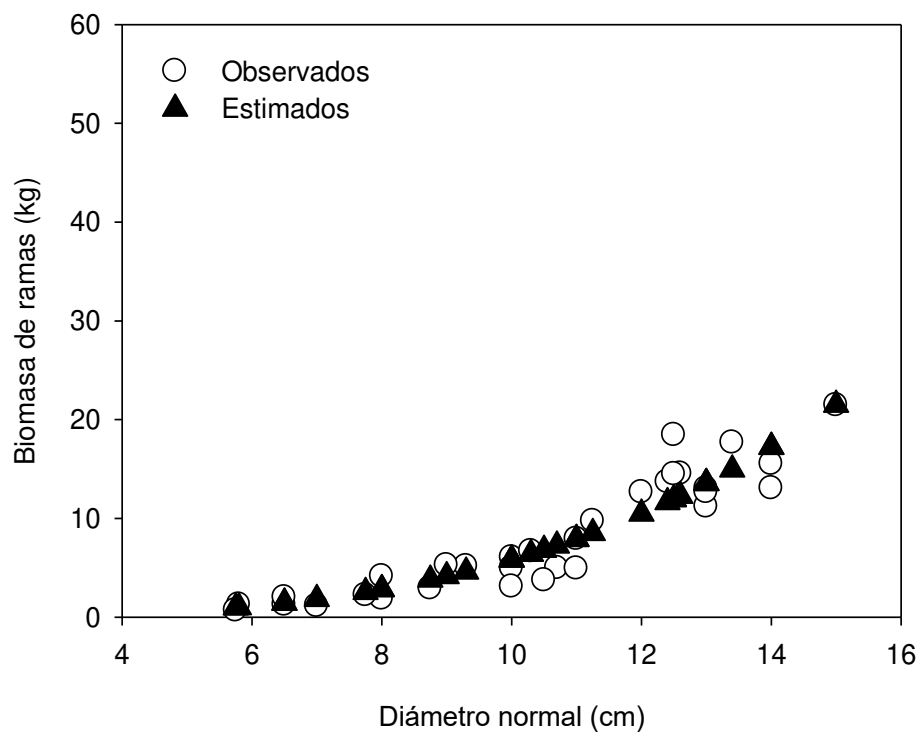


Figura 3. Biomasa observada y estimada de ramas en *Tectona grandis*

4.4.3 Estimación de biomasa en el componente fuste

El componente fuste presentó la menor variación en comparación con el resto de componentes, expresando un coeficiente de variación de 12.01 %.

Este componente tiene una mayor absorción de biomasa respecto a las hojas y ramas, y va en aumento conforme va creciendo el árbol en diámetro, como se puede apreciar en la Figura 4.

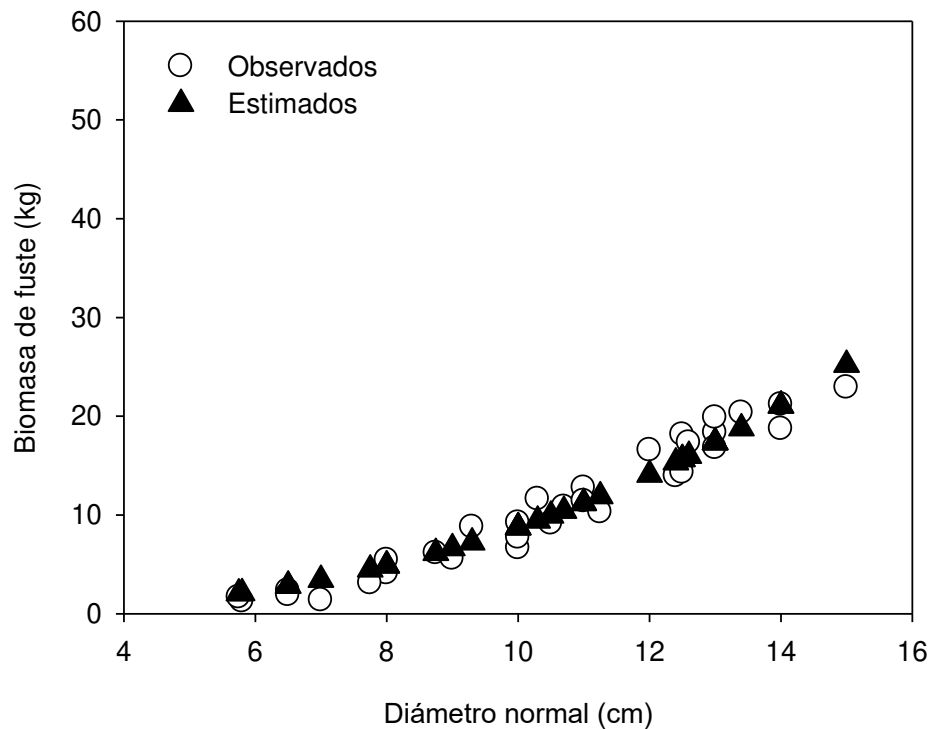


Figura 4. Biomasa observada y estimada de fuste en *Tectona grandis*

4.4.4 Estimación de biomasa en el componente total

La biomasa aérea es la más estudiada en la mayoría de las investigaciones, debido a la importancia y el aporte de información que brinda en cada una de las especies. La acumulación de biomasa total es variable y dependen de las condiciones que el árbol tiene para desarrollarse (clima, suelo, entre otros.).

El componente total presentó un coeficiente de variación de 13.92 %, presentando una mayor dispersión de los estimados respecto a los observados en los últimos diámetros (Figura 5).

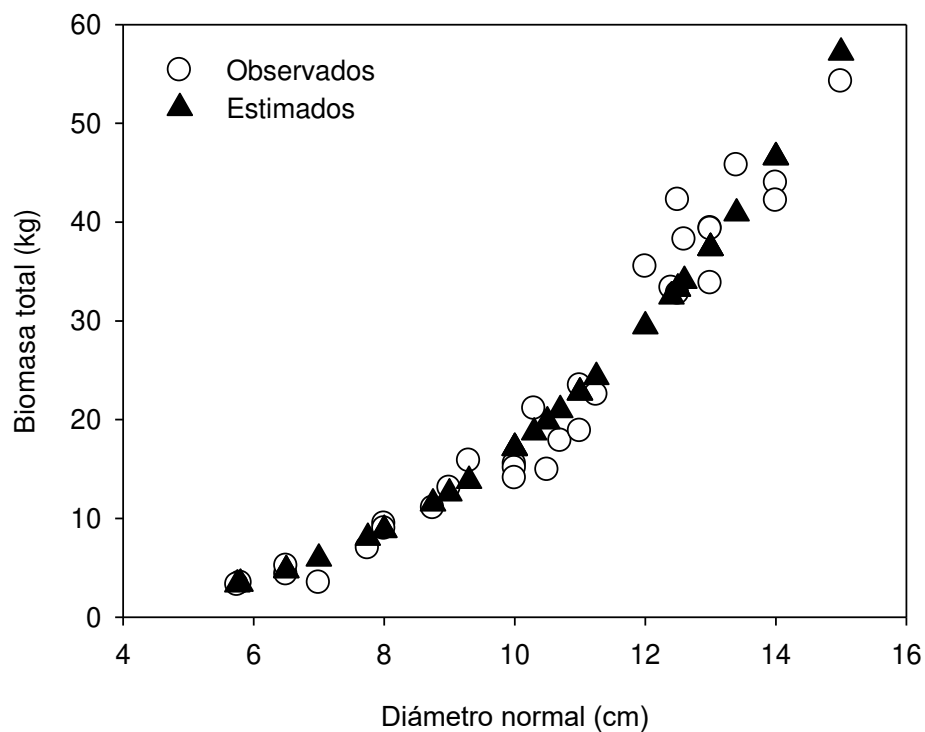


Figura 5. Biomasa observada y estimada total en *Tectona grandis*

4.5 Acumulación de biomasa en cada uno de los componentes de *Tectona grandis*

La mayor cantidad de biomasa se distribuyó en el componente fuste, respecto a la biomasa total. Posteriormente siguió ramas y finalmente las hojas. De los individuos derribados se obtuvo una biomasa acumulada de 121, 258, 349 y 729 kg en hojas, ramas, fuste y total (Figura 6).

En plantaciones de teca Gerardo et al. (2018) y Buvaneswaran et al. (2006) registraron un porcentaje de biomasa en hojas del 3 y 5 %, estos valores porcentuales de biomasa que reportaron los autores son menores a este estudio. Estos porcentajes son diferentes a la diferencia de edad que presenta este estudio con el de los autores, debido a que las edades de las plantaciones de teca en sus estudios están por arriba de los 14 años.

Para el componente ramas los valores son similares a los que presentan estos autores; Monroy et al. (2004) reportaron un 34 %, y López et al. (2016) un 37 %. Cabe mencionar que las edades son similares a esta investigación, sin embargo, la especie (*Hevea brasiliensis*) es diferente.

El componente fuste muestra la mayor proporción de biomasa en comparación con el resto de componentes para árboles de teca (Gerardo et al., 2018). En la Figura 6 el compartimento fustal presenta el mayor porcentaje de biomasa, este porcentaje es cercano al que encontró González et al. (2014), obteniendo una proporción del 50 % en el componente fuste. Caso contrario para Murillo et al. (2015) reportaron un 59 %, siendo este valor diferente al de este estudio.

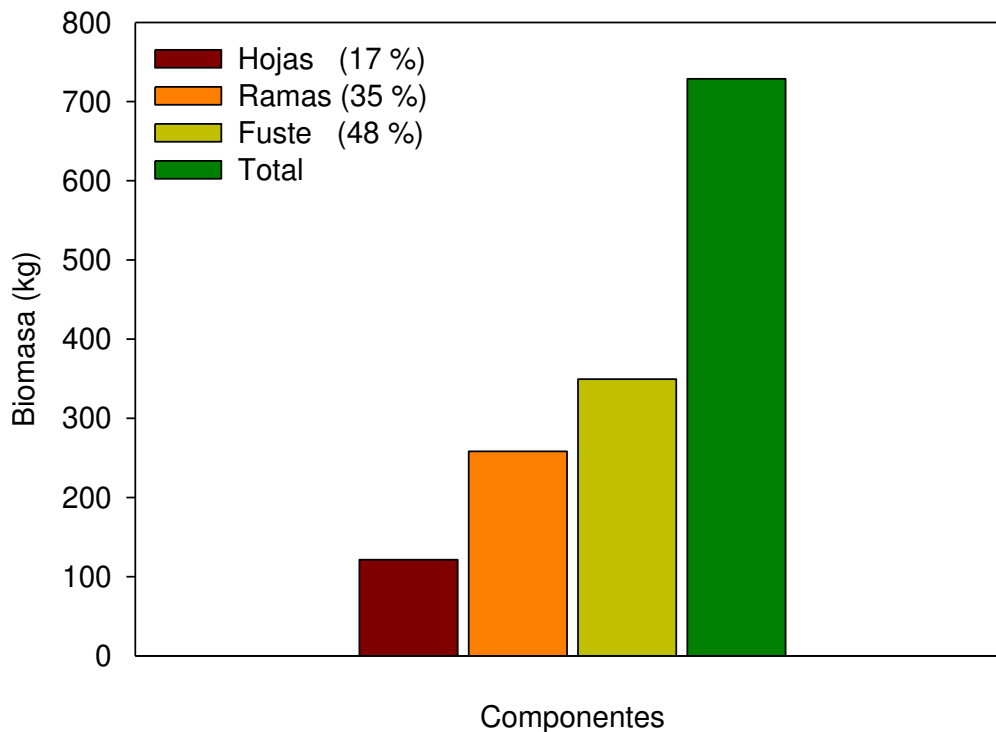


Figura 6. Reserva de biomasa por componentes (n = 32 individuos)

4.6 Biomasa por categoría diamétrica en cada componente de *Tectona grandis*

La Figura 7 muestra la tendencia o proporción de la biomasa en cada una de las categorías diamétricas. El componente hojas es la que presentó una menor proporción en cada categoría, seguida las ramas, predominando así el fuste.

Estas mismas proporciones de biomasa que se obtuvo en este estudio, son semejantes a los que presentan otros estudios en plantaciones de teca. Primeramente, se presenta el de menor porcentaje de biomasa, siendo este el componente hojas, sucesivamente ramas y por último el componente fuste (kraenzel *et al.*, 2003; Mbaekwe y Mackenzie, 2008).

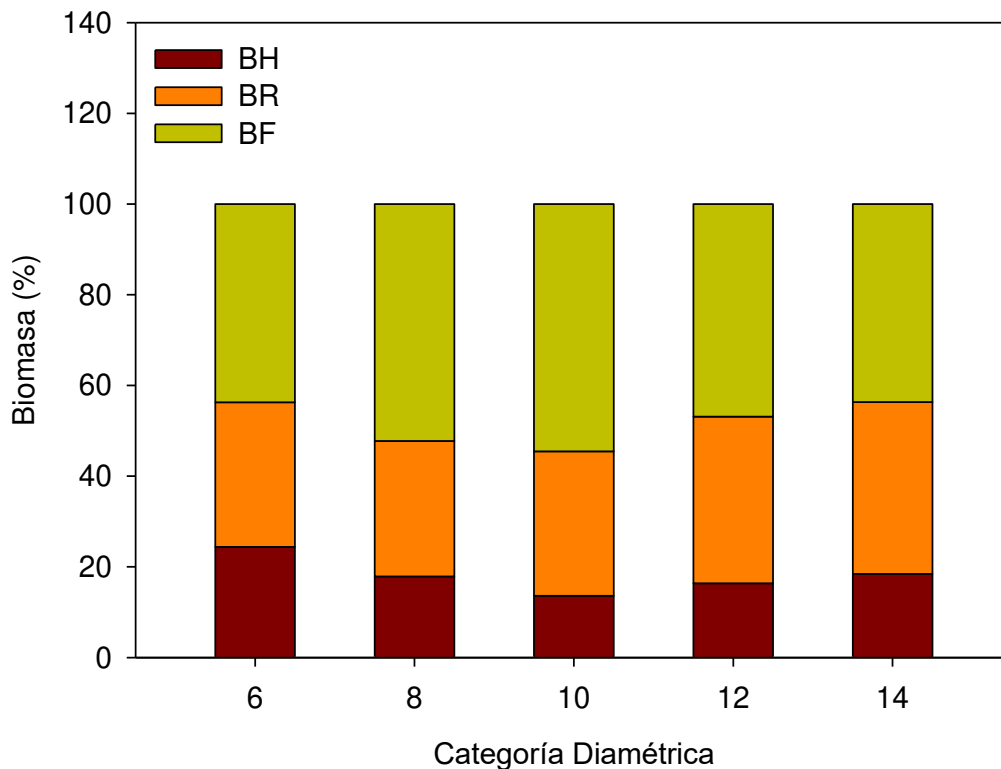


Figura 7. Proporción de biomasa en cada componente de *Tectona grandis*

4.7 Error por cada componente de biomasa de *Tectona grandis*

En el componente total el modelo 4 presentó errores más altos, en comparación con el resto de los componentes, dichos errores corresponden a los diámetros mayores, así mismo presentan una mediana de -0.24 kg (Figura 8).

Los límites de errores que se presentan en el componente hojas van aproximadamente de -2 a 2 kg, obteniendo una mediana de 0.25 kg. Todos los componentes (hojas, ramas fuste y total) tienen una mediana aproximada a cero (Figura 8).

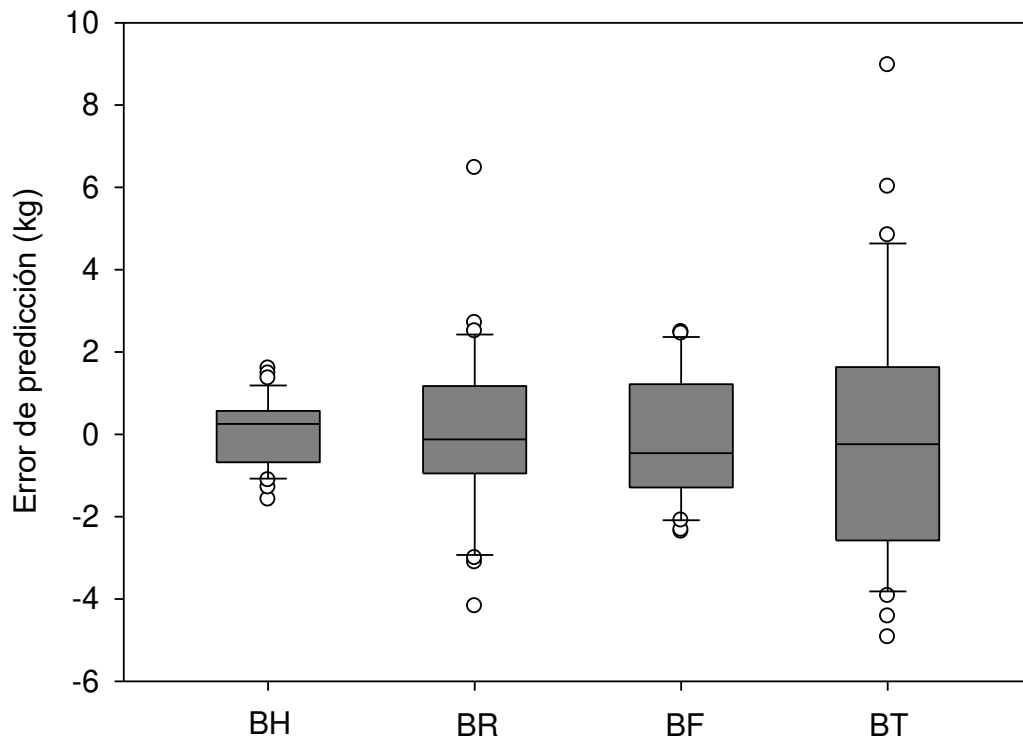


Figura 8. Errores de predicción en cada componente de *Tectona grandis*

4.8 Comparación de biomasa aérea estimada con otros autores

Las estimaciones de biomasa total de este estudio son similares a los que presentaron Kenzo et al. (2009) para árboles tropicales. Así mismo la biomasa total que se estimó fue semejante a la de Kraenzel et al. (2003) en los primeros diámetros, a partir de 10 cm de diámetro fue superior.

Al estimar la biomasa de *Tectona grandis* y compararla con otros autores, se encontró que las estimaciones de biomasa de esta investigación son menores a la que presentan otros autores (Figura 9). El coeficiente de determinación que presentó este estudio fue similar a los coeficientes que presentan los autores en sus investigaciones (Figura 9), excepto el de dos autores; Monroy et al. (2004) y Rodríguez et al. (2018).

El modelo 4 solo considera la variable diámetro, esto es una ventaja debido a que en los inventarios siempre consideran esta variable al momento de evaluar los árboles, a si también esta variable es fácil de medir y de rápido levantamiento en campo, caso contrario a la variable altura (montero *et al.*, 2005). Cabe resaltar que este modelo puede ser utilizado para estimar la biomasa en cada uno de sus componentes, considerando las condiciones similares al de este estudio.

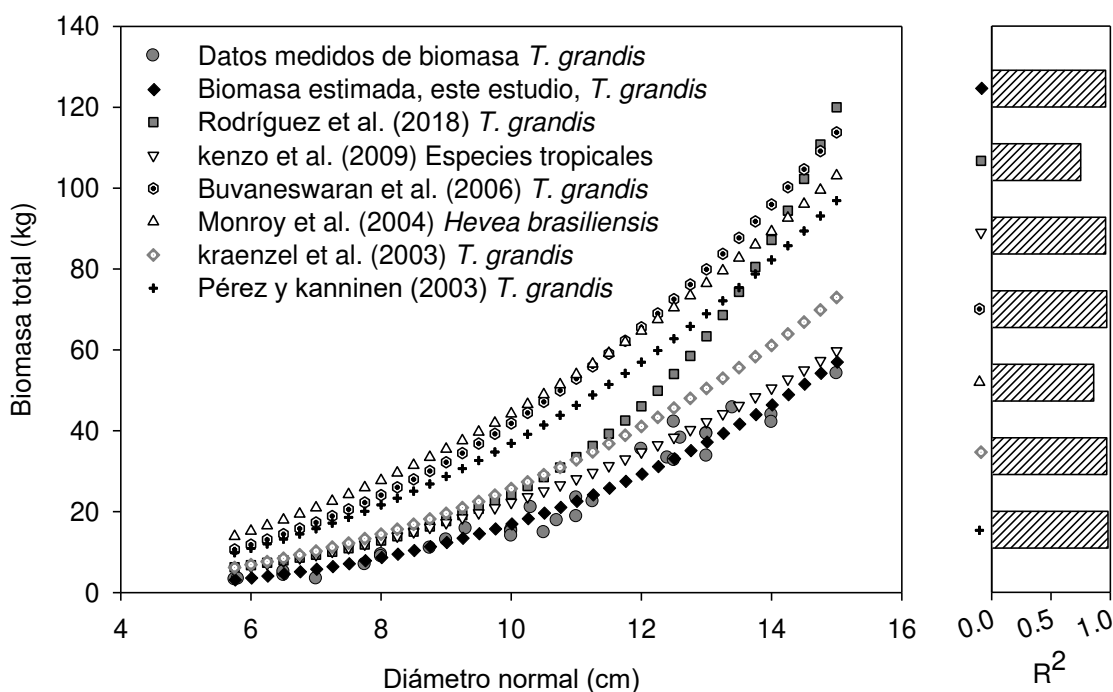


Figura 9. Comparación de ecuaciones desarrolladas para estimar la biomasa aérea

4.9 Tabla de biomasa en *Tectona grandis*

La biomasa es de gran relevancia ya que mediante ella se estima el carbono, y posteriormente el dióxido de carbono. Es por eso que en el Cuadro 5 se puede observar el potencial que tiene la teca para la absorción de biomasa en cada uno de sus componentes por categoría diamétrica. Es por ello la clave para seguir impulsando las plantaciones forestales, además, que es una especie de alto valor económico y de rápido crecimiento.

A pesar que la teca tiene mucha demanda en el mercado y precios muy satisfactorios para el productor, esta especie puede ser utilizadas para áreas degradadas y al mismo tiempo ayuda a mitigar los gases de efecto invernadero (N'Guessa *et al.*, 2017).

Cuadro 5. Estimación de biomasa en *Tectona grandis*

Categoría diamétrica (cm)	Biomasa (kg)
Hojas	
2	0.01
4	0.09
6	0.39
8	1.11
10	2.49
12	4.82
14	8.40
16	13.61
18	20.83
20	30.47
Ramas	
2	0.03
4	0.30
6	1.12
8	2.84
10	5.83
12	10.49
14	17.23
16	26.48
18	38.70
20	54.34
Fuste	

2	0.13
4	0.80
6	2.30
8	4.88
10	8.74
12	14.08
14	21.06
16	29.86
18	40.62
20	53.49
<hr/> Total	
2	0.14
4	1.13
6	3.76
8	8.83
10	17.14
12	29.46
14	46.58
16	69.26
18	98.28
20	134.41

5. CONCLUSIONES

Solo una ecuación no lineal presentó mayor ajuste para la estimación de biomasa en comparación con las ecuaciones lineales. El modelo de potencia fue el que mejor se ajustó, y solo contempla una variable independiente. El diámetro normal predice adecuadamente la biomasa en hojas, ramas, fuste y total para la especie de teca, presentando la mejor estimación de biomasa en el componente fuste, debido a que presentó los mejores ajustes. La acumulación de biomasa tiene una tendencia, presentando el menor porcentaje de biomasa en el componente hojas, posteriormente las ramas y por último el fuste.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Aguirre, C. O. A. y Jiménez, P. J. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2 (6): 73 – 84.
- Arango, C. B. E. 2011. Sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. 21 p.
- Arguedas, M. M. 2011. La huella de carbono del Instituto Tecnológico de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana*, 9 (22): 51 - 59.
- Badano, E. I. 2011. Conservación y restauración de bosques mexicanos en el escenario del cambio global: una responsabilidad compartida con beneficios múltiples. *Madera y Bosques*, 17 (2): 7 - 18.
- Becerril, P. R., González S. E., y Ramos, S. N. M. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1 (1): 9 - 18.
- Benavides, B. H. O. y León, A. G. E. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota técnica del IDEAM. 202 p.
- Bohre, P., Chaubey, O. P. y Singhal, P. K. 2013. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 5 (3): 153 – 174.

- Boley, D. J., Drew, P. A. y Andrus, E. R. 2009. Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 257 (11): 2254 - 2261.
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M. and Kauppi, P. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere management by forest. *Commonwealth Forestry Review*, 75: 80 - 91.
- Buvaneswaran, C., George, M., Perez, D. y Kanninen, M. 2006. Biomass of teak plantations in Tamil nadu, India and Costa Rica compared. *Journal of Tropical Forest Science*, 18 (3): 195 – 197.
- Camacho, L. A., Ramírez, M. H., De los Santos, P. H. M. y Zamudio, S. F. J. 2013. Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.F.) en el estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14 (19): 93 – 101.
- Chapin, F. S., Matson, P. A. y Mooney, H. A. 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York, USA: Springer. 123 – 156.
- Chapin, S., Manson, P. y Mooney, H. 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer Science & Business Media, New York, Inc.
- Chukwu, O. y Osho. A. J. S. 2018. Basal Area-Stump Diameter Models for *Tectona grandis* Linn. F. Stands in Omo Forest Reserve, Nigeria. *Journal of forest and environmental science*, 34 (2): 119 – 125.
- Cifuentes, J. M. 2010. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica. Informe Técnico / CATIE; 1a ed. no. 383. 71 p.

- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal. 2013. Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales. A 15 años de su creación. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 190 p.
- Correa, G. H. M. y Romero, H. O. M. 2016. "Cuantificación de biomasa aérea total, carbono almacenado y CO₂ fijado en árboles de teca. Caso de estudio". Revista De Los Desarrollo Local Sostenible, 1 (26): 9.
- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K. y Aguirre, C. 2014. Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. CEDAMAZ, 4 (1): 21 - 31.
- Díaz, F. R., Acosta, M. M., Carrillo, A. F., Buendía, R. E., Flores, A. E. y Etchevers, J. D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* schl. Et cham. Madera y Bosques, 13: 25 - 34.
- Doménech, Q. J. L. 2007. Huella ecológica y desarrollo sostenible. En: Globalización sostenible (Ed). Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España. 15 – 60 p.
- Ebuy, J., Lokombe, J. P., Ponette, Q., Sonwa, D. y Picard, N. 2011. Allometric Equation for Predicting Aboveground Biomass of Three Tree Species. Journal of Tropical Forest Science, 23 (2): 125 – 132.
- Escobar, E. y Maass, M. 2008. Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas, en Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México: CONABIO. 161 – 189 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2016. Food and Agriculture: Key to Achieving in the 2030. Rome: Agenda for Sustainable Development. FAO.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009. Future of teak and the high-grade tropical hardwood sector: planted forests and trees working paper FP/44E. Roma
- FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America. by R.V. De Camino, M. M., Alfaro, M. M. and Sage, L. F. M. Forest Plantations Working Paper 19. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO, Rome.
- FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. by Kollert, W. & Walotek, P. J. Planted Forests and Trees Working Paper FP/49/E. Rome, Italy.
- Fernández, M. J., Alvarado, A., San Miguel, A. A. y Marchamalo, S. M. 2014. Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. New Zealand Journal of Forestry Science, 44 (1): 1 - 8.
- Fierros, A., Noguez, A. y Velasco, E. 1999. Paquetes tecnológicos para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en ecosistemas de climas templados-fríos y tropicales de México. Vol. I. SEMANARP. México, D.F.
- Figuroa, N. C. M., Ángeles, P. G., Velázquez, M. A., y de los Santos, P., H. M. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 1: 147 -157.
- Fonseca, G. W., Alice, G. F. y Rey, B. J. M. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Bosque, 30 (1): 36 - 47.

- Fonseca, W., Rey, B. J. M. y Alice F. E. 2011. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262 (8): 1400 - 1408.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- González, M. Á. J., Rojas, H. J., Jiménez, G. R. M. y Chavarría, Ñ. F. J. 2014. Evaluación del crecimiento, potencial de secuestro y fijación de carbono de dos especies forestales en el Sistema Agroforestal Taungya en Rivas, Nicaragua. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11 (26): 12 - 18.
- Honorio, C. E. N. y Baker, T. R. 2010. Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds. Lima, 54 p.
- IPCC, 2013: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Jaramillo, V. J. 2010. El ciclo global del carbono. En J. Martínez y A. Fernández. (Eds), cambio climático: una visión desde México. 1 – 523.
- Kenzo, T., Ichie, T., Hattori, D., Itioka, T., Handa, C., Ohkubo, T., Jawa, K. J., Nakamura, M., Sakaguchi, M., Takahashi, N., Okamoto, M., Tanaka, O. A., Sakurai, K. y Ninomiya, I. 2009. Development of allometric relationships for accurate estimation

- of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, 25 (4): 371 – 386.
- Kraenzel, M., Castillo, A., Moore, T. y Potvin, C. 2003. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management*, 173: 213 -225.
- Kumar, P. 2009. Nutrient dynamics of teak plantations and their impact on soil productivity: A case study from India. XIII World Forestry Congress. Buenos Aires, Argentina. 11 p.
- López, H. G., Vaides, E. E. y Alvarado, A. 2018. Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42 (1): 137 – 153.
- López, O. L. A. 2012. Ecuaciones Alométricas y Estimación de Incrementos en Biomasa aérea en una Plantación de *Pinus halepensis* Mill. En Saltillo, Coahuila. Tesis de Maestría, UAAAN, Saltillo, Coahuila, México. 34 p.
- López, R. L. Y., Domínguez, D. M., Martínez, Z. P., Zavala, C. J., Gómez, G. A. y Posada, C. S. 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosque*, 22 (3): 49 - 60.
- Martín, C. J. 2010. Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18 (1): 33 – 46.
- Martínez, R. G. E., Jasso, M. J., Velásquez, M. A. 2003. Las masas forestales como sumideros de co2 ante un cambio climático global. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9 (1): 57 – 67.

- Matsumoto, M., Oka, H., Mitsuda, Y., Hashimoto, S., Kayo, C., Tsunetsugu, Y., & Tonosaki, M. 2016. Potential contributions of forestry and wood use to climate change mitigation in Japan. *Journal of Forest Research*, 21 (5): 211- 222.
- Mbaekwe, E. I. y Mackenzie, J. A. 2008. The use of a best-fit allometric model to estimate aboveground biomass accumulation and distribution in an age series of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations at Gambari Forest Reserve, Oyo State, Nigeria. *Tropical Ecology*, 47 (2): 259 – 270.
- Miranda, I., Sousa, V. and Pereira, H. 2011. Wood properties of teak (*Tectona grandis* L. f.) from a mature unmanaged stand in East Timor. *J. Wood Sci.* 57: 71 – 178.
- Monroy, R. C. y Návar, C. J. D. J. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 10 (2), 29-43.
- Montero G., R. Ruiz. P. y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 264 p.
- Murillo, R., Alvarado, A. y Mark, V. J. 2015. Concentración y acumulación de nutrimentos en la biomasa aérea de plantaciones de teca de 3 a 18 años en la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 39 (3): 117 -136.
- N'Guessa, N. F., Martínez, G. A. y Ebagnerin, T. J. 2017. Carbon Stocks in Selected Tree Plantations, as Compared with Semi-deciduous Forest in Centre-West Cote d'Ivoire. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239: 30 – 37.
- Nirala, D., Khanduri, V. P. y Sankanur, M. S. 2018. Biomass and Carbon Stock Assessment in Different Age Group Plantations of Teak (*Tectona grandis* Linn.

- F.) in Bhabar and Shivalik Regions of Uttarakhand. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 9 (3): 379 - 382.
- Ola-Adams, B. A. 1997. Assessment of Three Allometric Regression Techniques of Biomass Determination in Two Hardwood Species. Journal of Tropical Forest Science, 9 (3): 321 – 328.
- Ordoñez, D. J. A. B., Rivera, V. R., Tapia, M. M. E. y Ahedo, H. L. R. 2015. Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 6 (32): 7 – 16.
- Ounban, W., Puangchit, L. y Diloksumpun, S. 2016. Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn.f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Plantations in Thailand. Agriculture and Natural Resources, 50. 48 – 53.
- Pacheco, E. F. C., Andrete, A., Gómez, G. A., Fierros, G. A. M., Cetina, A. V. M. y Vaquera, H. H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus gregii* engelm. Revista Fitotecnia Mexicana, 30: 51 - 254.
- Pandey, D. y Brown, C. 2000. La teca: una visión global. Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales, 51: 3 – 13.
- Pardos, A. J. 1999. Ante un cambio climático: papel de los montes arbolados y los productos forestales en la retención del carbono. Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales, 1: 93 - 99.
- Pérez, C. L. D. y Kanninen, M. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science, 15 (1): 199 - 213

- Picard N., Saint, A. L., Henry, M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223 p.
- Portuguez, U. E. M. 2012. Estimación de la extracción de nutrientes por parte aérea en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y C&M Investment Group Ltda. En la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis de licenciatura en Costa Rica. 104 p.
- R Core Team. 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/> (28 de septiembre de 2018).
- Ranero, A. y Covalada, S. 2018. El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. Madera y Bosques, 24: 1 – 28.
- Rodríguez, L. R., Jiménez P. J., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J. y Razo, Z. R. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. Ra Ximhai, 5 (3): 317-327.
- Rodríguez, M., Arias, D., Valverde, J. C. y Camacho, D. 2018. Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* L.f. en Guanacaste, Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 15: 61 - 68.
- Rodríguez, O. G., De los Santos, P. H. M., González, H. V. A., Gómez, G. A. A. y Fierros, G. A. M. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. Madera y Bosques, 18 (1): 25 - 41.

- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile 13 p.
- Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Valdivia, Chile. 24 p.
- SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Protocolo de Kioto sobre cambio climático.
- Spracklen, D. V. y Righelato, R. 2016. Carbon storage and sequestration of re-growing montane forests in southern Ecuador. *Forest Ecology and Management*, 364: 139 - 144.
- Taiz, L., and Zeiger, E. 2002. *Plant physiology* 5th. Ed. Sinauer, Sunderland, Massachussets. 111 - 143 p.
- Tewari, V. P., Sukumar, R., Kumar, R. y Gadow, K. 2014. Forest observational studies in India: past developments and considerations for the future. *Forest Ecology and Management*, 316: 32 - 46.
- Verhaegen, D., Fofana, I. J., Logossa, Z. A. and Ofori, D. 2010. What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis* L. f.) introduced in Africa and in Indonesia? *Tree Gen. Genom.* 6: 717 – 733.
- Viriyabuncha, C., Chittachumnonk, P., Sutthisrisinn, C., Samran, S., Peawsaad, K. 2001. Adjusting equation to estimate the above-ground biomass of teak plantation in Thailand In: Katpraneet, S., Jitjumnong. 239 – 260 p.
- Viriyabuncha, C., Namsawat, S. y Bunasart, D. 2002. Aboveground Biomass, Leaf Area Index and Analysis of Increasing the Diameter Checking by Annual Ring of Teak

21 Years at Mae Cheam Plantation, Chiang Mai Province. Annual report of Royal Forest Department of Thailand. Bangkok, Thailand.

- Wheeler, C. E., Omeja, P. A., Chapman, C. A., Glipin, M., Tumwesigye, C. y Lewis, S. L. 2016. Carbon sequestration and biodiversity following 18 years of active tropical forest restoration. *Forest Ecology and Management*, 373: 44 – 55.
- Winck, R. A., Fassola, H. E., Barth, S. R., Crechi, E. H., Keller, A. E., Videla, D., y Zaderenko, C. 2015. Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. *Ciencia Florestal*, 25 (3): 595-606.
- Yerena, Y. J. I., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J. y Alanís R. E. 2012. Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3 (13): 49 - 56.
- Zhoukunnan, Z., Liang, K., Xu, D. y Zhang, Y. 2012. Effects of calcium, boron and nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings and chemical property of acidic soil substrate. *New Forests*, 43 (2): 231 – 243.